

PERHITUNGAN KERAPATAN ION NITROGEN PADA PEMBENTUKAN FeN DALAM PROSES NITRIDASI PLASMA

Widdi Usada

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan BATAN Yogyakarta
Jl Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281, e-mail :w_usada@yahoo.com

Diterima 14 Desember 2010, diterima dalam bentuk perbaikan 6 Januari 2011, disetujui 18 Januari 2011

ABSTRAK

PERHITUNGAN KERAPATAN ION NITROGEN PADA PEMBENTUKAN FeN DALAM PROSES NITRIDASI PLASMA. Telah dilakukan perhitungan kerapatan ion nitrogen pada pembentukan FeN dalam proses nitridasi plasma. Perhitungan menggunakan pengandaian derajat ionisasi dalam plasma $\alpha = 10^{-5}$, dan rumusan kekekalan muatan dalam penghitungan cacah partikel ion nitrogen serta teori tumbukan ion nitrogen dengan target Fe dalam proses pembentukan FeN. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk tekanan operasi gas nitrogen dengan jangkau 0,6 sampai 2 torr, maka jangkau kerapatan ion nitrogen adalah $1,6 - 3,5 \cdot 10^9$ partikel/cm³, dan jangkau rapat daya 0,2 – 1,6 W/cm². Sedangkan untuk pembentukan ikatan FeN, diperoleh cacah dari 0 sampai $1,4 \cdot 10^5$, untuk jangkau suhu dari 0 sampai sekitar $6 \cdot 10^4$ K

Kata kunci : plasma, ion, tumbukan,

ABSTRACT

THE CALCULATION OF NITROGEN ION DENSITY FOR FeN FORMATION IN PLASMA NITRIDATION PROCESS. The calculation of ion nitrogen density for FeN formation in plasma nitridation process has been done. The calculation was based on the assumption that plasma ionization degree was 10^{-5} , and using charge conservation rule and particle collision theory for calculating the number of nitrogen ion which collided the target and formation of FeN. Calculation results showed that for the range of nitrogen gas operation pressure from 0.6 to 2 torr, the density of nitrogen ion range was 1.6 to $3.5 \cdot 10^9$ particles/cm³, and power density range was 0.2 to 1.6 W/cm². Meanwhile for FeN bonding formation, it was achieved that the range of number particles from 0 to $1.4 \cdot 10^5$, for temperature range from 0 to $6 \cdot 10^4$ K.

Key words : plasma, ion, collision.

PENDAHULUAN

Salah satu metode untuk mendapatkan komponen mesin industri yang tahan aus dan mempunyai nilai kekerasan yang tinggi adalah dengan metode nitridasi plasma. Nitridasi plasma pada dasarnya adalah pemanfaatan ion nitrogen yang dikenakan pada bahan target, sehingga terjadi ikatan antara nitrogen dengan bahan target. Untuk ikut mendukung penyediaan komponen mesin industri yang unggul tersebut, lembaga ini telah menyusun program kegiatan Rancang Bangun Perangkat Nitridasi Plasma Dengan *Double Chamber* Untuk Perlakuan Komponen Mesin. Salah satu masalah yang perlu dibahas dalam perancangan sistem tersebut adalah perancangan sistem elektrode khususnya katode yang akan menerima beban tumbukan ion nitrogen berenergi tinggi, sehingga komponen yang diletakkan pada katode akan mengalami proses nitridasi plasma. Untuk mendapatkan perancangan elektrode yang baik diperlukan suatu pemahaman proses interaksi antara ion nitrogen dengan bahan target di elektrode termasuk berapa cacah dan energi ion nitrogen yang berasal dari plasma terbentuk yang berinteraksi dengan target, kemudian kebolehjadian pembentukan ikatan dan lain sebagainya. Perhitungan parameter fisis plasma dengan mendasarkan pada rumusan Paschen untuk perancangan piranti nitridasi plasma telah diperoleh parameter seperti kerapatan plasma, rapat arus dan daya.^[1] Namun demikian dalam proses nitridasi plasma untuk pembentukan FeN, masih ada beberapa masalah yang perlu difahami antara lain, kerapatan ion nitrogen, tegangan pemercepat rata-rata, dan kebolehjadian pembentukannya. Sebenarnya tidak hanya proses tersebut di atas yang masih perlu dibahas, namun permasalahan lain seperti disosiasi molekul N₂, dan pembentukan ion N⁺. Untuk memahami masalah-masalah khususnya yang disebutkan di depan, terlebih dahulu perlu difahami proses pelucutan dan karakteristik lucutan plasma, kemudian dicoba dikenalkan teori tumbukan untuk menjelaskan proses dalam nitridasi pada bahan besi.

DASAR TEORI

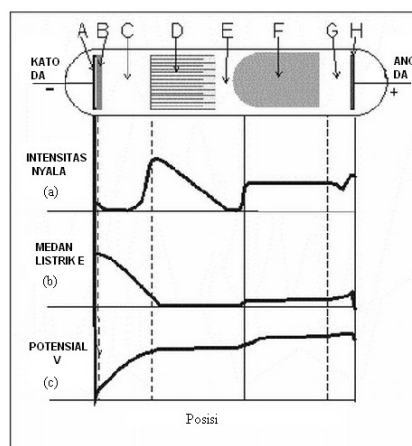
Karakteristik Lucutan Plasma

Plasma terbentuk setelah ada beda tegangan tertentu sehingga elektron-elektron bebas menumbuk gas dan mengakibatkan terjadinya proses ionisasi gas tersebut. Besarnya tegangan sehingga terjadi ionisasi oleh Paschen dirumuskan sebagai berikut,

$$V_{\text{dadal}} = \frac{\alpha (pd)}{\ln(pd) + b} \quad (1)$$

V dalam volt, p dalam atmosfer, dan d dalam m, a adalah tetapan yang direlasikan dengan tenaga ionisasi dan eksitasi gas, sedangkan b adalah tetapan ionisasi jenuh dari gas. Pada umumnya, untuk gas udara besarnya a adalah 365 volt/(cm.torr) dan b sekitar 1,18, sehingga dapat disusun besarnya tegangan dadal untuk berbagai variasi jarak dan tekanan gas.

Secara umum plasma didefinisikan sebagai kumpulan partikel bermuatan seperti elektron, ion bermuatan positif dan ion bermuatan negatif, juga dimungkinkan adanya partikel neutral, dan partikel tereksitasi. Fenomena plasma sedemikian luas spektrumnya baik yang dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, di laboratorium, dan juga di industri, bahkan di jagad raya.^[2,3,4] Plasma lucutan nyala, merupakan tipe sangat menarik, meskipun hanya bagian kecil dari fenomena plasma. Daya tarik dari lucutan nyala adalah mempunyai karakteristik spesifik yang sangat berguna bagi perkembangan industri seperti *plasma sputtering*, *plasma nitriding*, *laser*, penampil plasma dan lain sebagainya. Karakteristik lucutan antara dua elektrode pelat sejajar ditunjukkan Gambar 1. Dalam penelitian ini hanya beberapa daerah yang sangat berperan saja yang menjadi perhatian dalam pembahasan selanjutnya, yaitu daerah C dan daerah F. Pada umumnya daerah DEF menjadi satu yang disebut daerah plasma, yaitu besarnya kerapatan ion n_i dan kerapatan elektron n_e sama. Daerah DEF merupakan daerah pembentukan ion, karena elektron mempunyai tenaga paling tinggi sehingga mampu mendisosiasi molekul dan mengionisasi atom. Untuk proses nitridasi di daerah tersebut terjadi disosiasi molekul N_2 menjadi atom nitrogen dan ionisasi dari atom nitrogen menjadi ion nitrogen.



Gambar 1. Distribusi intensitas nyala (a), medan listrik (b) dan potensial (c) pada lucutan nyala.

Daerah Percepatan Ion dan Elektron

Intensitas nyala di daerah C hampir dikatakan nol, maka daerah tersebut disebut daerah gelap katode (*cathode dark space*), namun medan listrik (E) dan potensial listriknya (V) justru sangat besar maka daerah tersebut merupakan daerah percepatan terbesar bagi partikel bermuatan positif (ion positif) menuju ke katode, dan percepatan elektron menjauhi katode untuk membentuk proses disosiasi dan ionisasi.

Besarnya tegangan percepat daerah C dapat diperoleh sekitar

$$V_C = V_{AK} - V_P \quad (2)$$

V_C , adalah tegangan daerah gelap katode, V_{AK} adalah tegangan katode anode dan V_P adalah tegangan plasma. V_P tegangan yang diperoleh saat arus elektron menunjukkan arus jenuh (I_{ejenuh}). Secara umum karakteristik tipikal lucutan plasma ditunjukkan Tabel 1

Tabel 1. Karakteristik tipikal lucutan plasma

| Besaran | Kuantitas |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Tekanan | 0,01 - 10 Torr |
| Ukuran | 0,1 - 10 cm |
| Suhu katode | 300 - 1000 K |
| Kerapatan partikel bermuatan | $10^6 - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ |
| Tenaga elektron | 1 - 4 eV |
| Tenaga ion plasma | 0,01 eV |
| Tenaga ion di katode | 1 - 1000 eV |
| Derajat ionisasi (α) | $10^{-7} - 10^{-4}$ |

Dengan memahami karakteristik lucutan di atas maka diperoleh fenomena berikut :

1. Di daerah plasma, ion mempunyai energi yang sangat rendah, sehingga ion positif tidak memberikan dampak yang nyata untuk terjadi proses interaksi dengan atom atau molekul lain.
2. Ion memperoleh energi karena adanya tegangan di daerah percepatan, sehingga tumbukan ion dengan target akan mengakibatkan panas, dan kemungkinan terjadi pembentukan ikatan dengan bahan target.

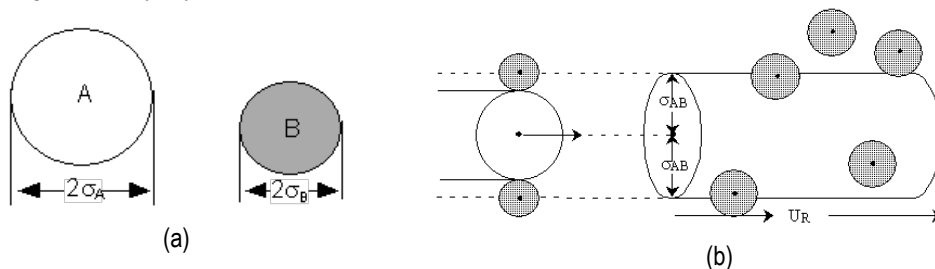
Untuk memperoleh besarnya kerapatan ion yang menuju ke katode, diperlukan persamaan kekekalan muatan yaitu

$$n_1 v_1 = n_2 v_2 \quad (3)$$

n_1 adalah kerapatan ion dalam plasma, v_1 , kecepatan ion dalam plasma, n_2 kerapatan ion di katode, dan v_2 kecepatan ion di katode.

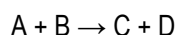
Tumbukan Partikel^[5]

Teori tumbukan yang akan digunakan dalam memahami interaksi partikel dengan mengandaikan bahwa partikel yang bertumbukan berbentuk bola, dan jenis tumbukannya *head-on*. Gambar 2 menunjukkan tumbukan dengan pengandaannya, yaitu tumbukan partikel berbentuk bola.



Gambar 2. Model tumbukan *head-on* dengan partikel A dan B berbentuk bola

Dengan pengandaian tersebut, maka untuk interaksi partikel A dengan B dapat direlasikan dengan reaksi kedua partikel dan membentuk partikel C dan D, yang dituliskan sebagai



Dengan model di atas, maka dari Gambar 2(a), partikel A mempunyai diameter $2\sigma_A$ dan partikel B mempunyai diameter $2\sigma_B$, jari-jari masing-masing partikel adalah σ_A , σ_B . Jari-jari tumbukan adalah σ_{AB} .

$$\sigma_{AB} = \sigma_A + \sigma_B$$

dan tampang lintang tumbukan menjadi

$$S_r = \pi \sigma_{AB}^2$$

Pengandaian selanjutnya, berdasar Gambar 2(b), maka molekul B dalam keadaan diam, sedangkan molekul A bergerak menuju molekul B dengan kecepatan relatif U_R . Kecepatan relatif ini didefinisikan sebagai

$$U_R = \left(\frac{8T k_B}{\pi \mu_{AB}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

dengan k_B = tetapan Boltzmann = $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K/molekul}$ = $1.381 \text{ kg m}^2/\text{detik}^2/\text{K/molekul}$, m_A = massa molekul gas A (gm), m_B = massa molekul gas B (gm), T adalah suhu partikel, dan μ_{AB} adalah massa tereduksi yang didefinisikan sebagai

$$\mu_{AB} = \frac{m_A m_B}{m_A + m_B} \quad (5)$$

Dalam beberapa hal sering digunakan satuan mol, maka konstanta dan besaran yang digunakan memuat M_A = Berat molekul A, M_B = Berat molekul B, N_{Av} = Bilangan Avogadro = 6.022×10^{23} molekul/mol, R = Tetapan gas ideal = 8.314 J/mol/K = $8.314 \text{ kg m}^2/\text{detik}^2/\text{mol/K}$.

$$R = N_{Av} k_B \quad \text{dan} \quad M_A = N_{Av} m_A$$

sehingga tetapan $\frac{k_B}{\mu_{AB}}$ direlasikan dengan

$$\frac{k_B}{\mu_{AB}} = \left[\frac{R}{\frac{m_A m_B}{m_A + m_B}} \right] \quad (6)$$

Rumusan-rumusan di atas digunakan untuk memperoleh besaran-besaran baru yaitu jumlah tumbukan, seluruh partikel A dengan seluruh partikel B, Z_{AB} dengan satuan partikel/detik/cm³, yang didefinisikan sebagai

$$Z_{AB} = \pi \sigma_{AB}^2 U_R C_A C_B$$

dengan C_A konsentrasi partikel A dan C_B konsentrasi partikel B, dan substitusi U_R , diperoleh relasi^[8]

$$Z_{AB} = \pi \sigma_{AB}^2 \left[\frac{8k_B T}{\pi \mu_{AB}} \right]^{1/2} \exp\left(\frac{-E_a}{kT} \right) C_A C_B \quad (7)$$

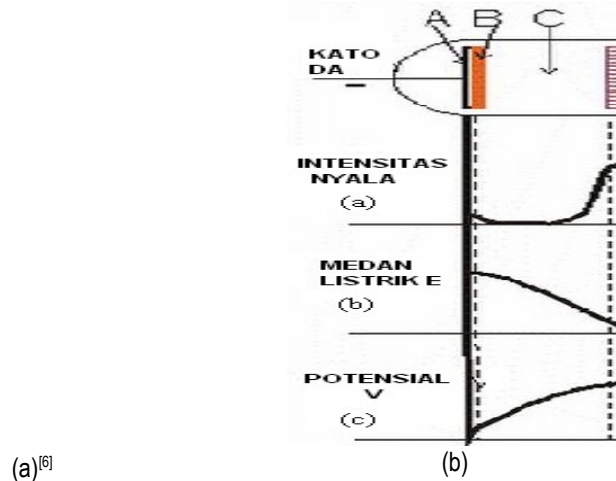
Disini telah dimasukkan faktor eksponensial yang menunjukkan bahwa akan terjadi reaksi bila tenaga interaksi antara kedua partikel yang bertumbukan telah melampaui energi aktivasi E_a .

PERHITUNGAN, HASIL DAN PEMBAHASAN

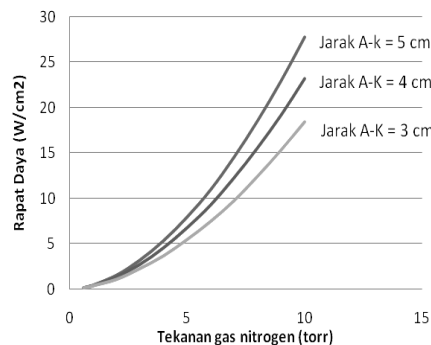
Penentuan Kerapatan Ion Nitrogen di Daerah Katode dan Rapat Daya

Gambar 3, menunjukkan piranti plasma nitriding dengan material yang dinitridasi serta karakteristik lucutan nyala di sekitar katode, untuk digunakan sebagai penolong dalam membayangkan terjadinya proses pembentukan nitrida besi. Dalam gambar ditunjukkan bahwa material yang dinitridasi diletakkan pada katode, sehingga material yang dinitridasi akan ditumbuki oleh ion nitrogen berenergi tinggi. Pengambilan contoh derajat ionisasi $\alpha=10^{-5}$, karena pada nilai sebesar itu lucutan nyala cukup stabil, bila dibandingkan untuk nilai 10^{-7} dan 10^{-4} , karena pada daerah tersebut lucutan nyala tidak stabil. Nilai derajat ionisasi $\alpha=10^{-4}$, merupakan daerah kritis, karena lucutan akan berubah menjadi lucutan busur. Bila lucutan busur muncul maka nilai arus akan sedemikian

besar, maka efek pemokusan akan muncul, sehingga lucutan hanya terjadi di suatu daerah tertentu saja, oleh karena itu pengaturan tegangan dan tekanan operasi perlu diperhatikan. Efek pemokusan adalah efek yang muncul akibat arus yang besar menimbulkan medan magnet induksi, dan medan magnet induksi ini akan mengakibatkan adanya gaya kompresi radial ke arah dalam, sehingga plasma akan mengecil. Selain efek pemokusan, karena arus sedemikian besar, maka jumlah cacah ion yang menumbuk target akan semakin besar, dan kondisi ini akan mengakibatkan pemanasan target yang sedemikian cepat, padahal berdasarkan eksperimen suhu operasi proses nitridasi plasma tertentu. Pengambilan nilai $\alpha=10^{-7}$, juga merupakan keputusan yang tidak bagus, karena pada lucutan nyala seperti disebutkan di atas menjadi tidak stabil, karena pembentukan ion baru terlalu kecil untuk menopang terjadinya lucutan nyata yang stabil, disamping itu laju arus terlalu kecil sehingga proses pembentukan nitridasi juga akan sangat lama.



Gambar 3. Piranti nitridasi plasma dan karakteristik lucutan di sekitar katode



Gambar 4. Rapat daya sebagai fungsi tekanan gas nitrogen

Berdasarkan hasil perhitungan^[9] dengan alur perhitungan seperti ditunjukkan pada LAMPIRAN dan dengan menggunakan persamaan (3), serta tegangan rata ion nitrogen adalah $\frac{1}{2} V_{\text{operasi}}$, maka rapat daya untuk berbagai jarak anode (A) katode (K) sebagai fungsi tekanan diperlihatkan pada Gambar 4. Gambar 4, memperlihatkan bahwa semakin tinggi tekanan operasi, semakin besar pula daya yang dibutuhkan.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 4, untuk jarak anode dan katode, semakin jauh, rapat daya yang dibutuhkan juga semakin besar. Hasil perhitungan juga menunjukkan bahwa untuk jangkauan tekanan operasi 0, 6 sampai dengan 2 torr, rapat daya berkisar dari 0.2 sampai dengan 1,6 W/cm², seperti ditunjukkan Tabel 2.

Tabel 2. Hasil perhitungan parameter tekanan, kerapatan, rapat arus serta rapat daya untuk jarak katode anode 5 cm

| P (torr) | P (atm) | No (cm ⁻³) | V _{breakdown} (V) | V _{op} (V) | V _{rerata} =V ₂ (V) | n _i (cm ⁻³) | J _i (A/cm ²) | R (W/cm ²) |
|-------------|------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------|--|---------------------------------------|--|---------------------------|
| 0.6 | 0.00079 | 2.1E+16 | 480 | 360 | 180 | 1.6E+09 | 0.0012 | 0.2 |
| 0.7 | 0.00092 | 2.4E+16 | 525 | 394 | 197 | 1.7E+09 | 0.0014 | 0.3 |
| 0.8 | 0.00105 | 2.8E+16 | 568 | 426 | 213 | 1.9E+09 | 0.0017 | 0.4 |
| 0.9 | 0.00118 | 3.1E+16 | 611 | 458 | 229 | 2.0E+09 | 0.0018 | 0.4 |
| 1 | 0.00132 | 3.5E+16 | 654 | 491 | 245 | 2.2E+09 | 0.0021 | 0.5 |
| 2 | 0.00263 | 7.0E+16 | 1048 | 786 | 393 | 3.5E+09 | 0.0041 | 1.6 |

Kebolehjadian Pembentukan FeN

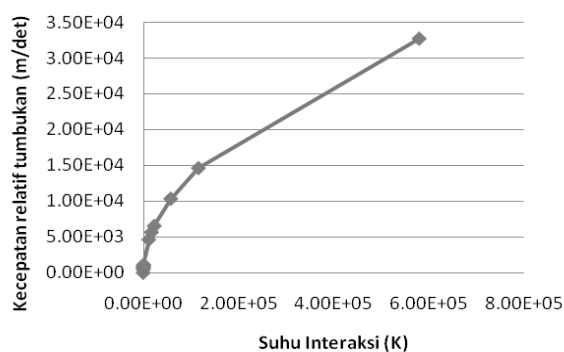
Pembentukan ikatan antara Fe dengan nitrogen sangat beragam, mulai dari FeN, Fe₂N dan Fe₄N dan selanjutnya. Dalam makalah ini hanya ditinjau pembentukan FeN saja.

Dengan melihat tabel besarnya jari-jari atom Fe dan N^[7,8], maka diperoleh beberapa parameter sebagai berikut :

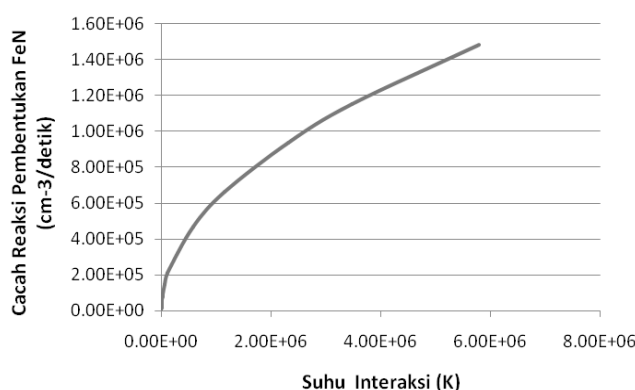
| Reaksi A + B → C + D | σ _A (m) | σ _B (m) | S _{AB} (m ² /par) | M _A (x m _p) | M _B (x m _p) | k _B /μ _{AB} |
|----------------------|--------------------|--------------------|--|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Fe + N → FeN | 1.26E-10 | 8.75E-11 | 1.43E-19 | 56 | 1.40E+01 | 726.25 |

dengan σ_A (m) adalah jari-jari atom Fe, σ_B (m) jari-jari ion N, S_{AB} (m²/par) adalah tampang lintang tumbukan atom Fe dengan dengan ion N, M_A massa atom Fe, dan M_B massa ion N, k_B tetapan Boltzmann dan μ_{AB} massa tereduksi partikel Fe dan ion N.

Dengan menggunakan persamaan (4) sampai (7) maka laju cacah pembentukan FeN dan kecepatan relatif tumbukan sebagai fungsi suhu diperlihatkan pada Gambar 5 dan 6.^[9]



Gambar 5. Kurva kecepatan tumbukan relatif sebagai fungsi suhu



Gambar 6. Laju cacah pembentukan FeN sebagai fungsi suhu

Dengan teori tumbukan ini dapat diketahui cukup banyak besaran fisis, seperti kecepatan relatif tumbukan, kebolehjadian tumbukan frekuensi tumbukan dan cacah pembentukan ikatan baru. Seperti ditunjukkan Gambar 5 dan 6., maka tampaklah bahwa untuk suhu semakin tinggi, maka disamping kecepatan relatif tumbukan semakin besar demikian pula jumlah cacah ikatan yang terbentuk.

KESIMPULAN

Dengan persamaan kekekalan muatan dapatlah diketahui kerapatan ion nitrogen yang menumbuk target, dengan demikian dapat diketahui rapat daya sistem. Besaran rapat daya dan kerapatan ion nitrogen sangat penting untuk memperkirakan panas yang diterima oleh target, dan kebolehjadian pembentukan ikatan baru seperti FeN. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk tekanan operasi gas nitrogen dengan jangkau 0,6 sampai 2 torr, maka jangkau kerapatan ion nitrogen yang $1,6 - 3,5 \cdot 10^9$ cacah/cm³, dan jangkau rapat daya 0,2 – 1,6 W/cm². Rentang pembentukan ikatan FeN pada suhu 0 K sampai sekitar $6 \cdot 10^4$ K, adalah dari 0 sampai $1,4 \cdot 10^5$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada KPTF dan Redaksi Jurnal Ganendra, yang telah mengoreksi makalah ini sehingga isi makalah menjadi lebih baik, kepada Bapak Ir. Suprpto dan Bapak Drs. Tjipto Sujitno MT, APU yang memberikan tugas untuk membantu beliau dalam rancangan elektroda untuk plasma *nitriding*. Terima kasih pula kepada Bapak Prof. Sudjarmoko yang telah memberikan tugas untuk membantu beliau dalam program Blockgrant 2010. Terima kasih kepada Bapak Drs Agus Purwadi dan Bapak Drs Aminus Salam, dalam diskusi tentang penelitian plasma. Penelitian ini sepenuhnya dibiayai dari kegiatan penelitian Rancangbangun perangkat nitridasi plasma dengan *double chamber* untuk perlakuan komponen mesin anggaran DIPA 2010.

DAFTAR PUSTAKA

1. WIDDI USADA DKK, Perhitungan Parameter Plasma Pada Perancangan Piranti Nitridasi Plasma 20 kW, prosiding PPI Akselerator 2009.
2. ANONIM, Electrical Break-downs Limits for MEMS, ECE234/424 Handout, January, 2007
3. ANNA KRAVCHENKO and HAKAN CANDAN, Glow Discharge, First published on the web: 09.12.2007. The text is based on a lecture given by Zoltan Donko, RISSP Budapest, at the first Gladnet training course in Antwerp Sept. 2007, www.Gladnet.eu
4. C.S. WONG, The Glow Discharge, in Proceedings of 1984 Tropical College on Applied Physics, Laser and Plasma Technology, edited by S. Lee, et al, World Scientific Publish Co. Pte, Ltd, 1985.
5. ANONIM, Collision theory, in http://en.wikipedia.org/wiki/collision_theory.
6. SUPRAPTO, Desain Perangkat Nitridasi Plasma dengan *Double Chamber* Untuk Perlakuan Komponen Mesin, 2009 untuk presentasi rapat koordinasi.
7. Iron in <http://en.wikipedia.org/wiki/Iron>
8. Nitrogen in <http://en.wikipedia.org/wiki/Nitrogen>
9. WIDDI USADA, Perhitungan Break-down Revisi 2.xls.microsoft excel files, 2009

LAMPIRAN

Diagram Alir Perhitungan kerapatan ion nitrogen dan lain lain di daerah pemercepat

